УДК 535.36

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОГРАНИЧЕННОСТИ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Б.В. Горячев, С.Б. Могильницкий

Томский политехнический университет
E-mail: msb@tpu.ru

Исследовано влияние пространственной ограниченности дисперсной среды на распределение излучения и характеристики качества изображения, получаемого через рассеивающую среду конечных размеров. Определен способ расчета краевой функции и функции контрастности светлой полоски. Показано, что пространственная ограниченность дисперсной среды и условия освещения оказывают значительное влияние на характеристики качества изображения.

Вопросы расчета распределения излучения являются актуальными для задач переноса изображения в дисперсной среде [1, 2]. Однако основные величины, описывающие качество изображения, получаемого через рассеивающую среду, определены только для среды, неограниченной в поперечном направлении (по отношению к направлению распространения излучения).

В данной работе рассматривается распределение излучения на выходе из пространственно ограниченной дисперсной среды, имеющей форму параллелепипеда, при различных условиях освещения одной из граней объема. В расчетах используется метод многократных отражений [3], на основе которого получен способ определения краевой функции и функции контрастности светлой полоски.

Рассмотрим объем дисперсной среды в виде прямоугольного параллелепипеда с оптическими размерами τ_x, τ_y, τ_z, где x, y, z – оси декартовой системы координат, совпадающие с ребрами параллелепипеда. При нормальном освещении одной из граней объема параллельным потоком монохроматического излучения энергетические составляющие радиационного баланса данного объема определяются по методике, приведенной в [3]. В зависимости от направления падения излучения реализуются три варианта радиационного баланса. При освещении по оси x – составляющие радиационного баланса следующие: I_x^+ – интенсивность излучения, прошедшего объем, I_x^- – интенсивность излучения, отраженного объемом, $2(I_x^y+I_x^z)$ – интенсивность излучения, вышедшего через боковые грани; по оси y такие же составляющие баланса равны соответственно I_y^+, I_y^-, $2(I_y^x+I_y^z)$; по оси z составляющие радиационного баланса – I_z^+, I_z^-, $2(I_z^x+I_z^y)$.

При освещении объема с дисперсной средой излучением интенсивностью $I_0=1$ условия нормировки следующие: при освещении грани yz – $I_x^++I_x^-+2I_x^y+2I_x^z=1$, при освещении грани xz – $I_y^++I_y^-+2I_y^x+2I_y^z=1$, при освещении грани xy – $I_z^++I_z^-+2I_z^x+2I_z^y=1$.

Применим методику расчета распределения излучения на выходе из дисперсной среды к определению характеристик, определяющих качество изображения, регистрируемого через дисперсную среду. Такими характеристиками являются функции: рассеяния точки $P(\tau)$, рассеяния линии $L(\tau)$, краевая $J(\tau)$, контрастности светлой $C(\tau)$ и темной $C'(\tau)$ полосок, передачи модуляции T.

Ниже приведен способ определения краевой функции. Она характеризует распределение освещенности в изображении светящейся полуплоскости и формируется при нормальном освещении плоского слоя дисперсной среды параллельным пучком света, ограниченным полуплоскостью, суммой функций рассеяния линии. Для краевой функции справедливо соотношение:

$$L(\tau)=-\frac{dJ(\tau)}{d\tau},$$

т.е., если известна краевая функция, то график зависимости ее производной от τ определяет функцию рассеяния линии.

Для бесконечной в поперечном направлении (по отношению к направлению падения излучения) дисперсной среды краевая функция однозначно определяется микрофизическими параметрами среды. Если среда пространственно ограничена, то краевая функция дополнительно зависит от оптических размеров среды и положения границы раздела свет/тень относительно объема дисперсной среды.

Рассмотрим функцию контрастности светлой полоски шириной b, которая связана с функцией рассеяния линии:

$$L(\tau)=-I^+\frac{dC(b)}{db}.$$

Тогда $L(\tau)$ можно найти, определяя зависимость функции контрастности светлой полоски от ее ширины.

Функция контрастности темной полоски определяется следующим образом. Осветим дисперсную среду бесконечно широким параллельным пучком света и закроем часть падающего излучения непрозрачным экраном в виде бесконечно длинной полоски шириной b. Тогда $C'(b)=1-C(b)$.

$$L'(\tau)=-I^+\frac{dC'(b)}{db}.$$

При наблюдении объекта через дисперсную пространственно ограниченную среду необходимо учитывать оптические размеры среды и положение

полоски (светлой или темной) относительно границы среды.

При нормальном падении излучения по оси x возможны два варианта освещения грани yz: прямая, разделяющая освещенную и неосвещенную части, проходит параллельно оси z, или параллельно оси y. В первом случае выход излучения $I_1^{+1x}(\tau,\Lambda)$ из освещенного слоя и $I_2^{+1x}(\tau,\Lambda)$ из неосвещенного слоя в направлении $+x$ равен

$$I_1^{+1x}(\tau,\Lambda) = I_{1x}^{+} + \frac{I_{2y}^{-} I_{1x}^{y} I_{1y}^{x}}{1 - I_{1y}^{-} I_{2y}^{-}}; \quad I_2^{+1x}(\tau,\Lambda) = \frac{I_{1x}^{y} I_{2y}^{x}}{1 - I_{1y}^{-} I_{2y}^{-}}.$$

Во втором случае выход излучения $I_1^{+2x}(\tau,\Lambda)$ из освещенного слоя и $I_2^{+2x}(\tau,\Lambda)$ из неосвещенного слоя в направлении $+x$ равен

$$I_1^{+2x}(\tau,\Lambda) = I_{1x}^{+} + \frac{I_{2z}^{-} I_{1x}^{z} I_{1z}^{x}}{1 - I_{1z}^{-} I_{2z}^{-}}; \quad I_2^{+2x}(\tau,\Lambda) = \frac{I_{1x}^{z} I_{2z}^{x}}{1 - I_{1z}^{-} I_{2z}^{-}}.$$

При освещении грани xy и падении излучения по оси z выход $I_1^{+1z}(\tau,\Lambda)$ из освещенной части и $I_2^{+1z}(\tau,\Lambda)$ из неосвещенной части грани в направлении $+z$ равен

$$I_1^{+2z}(\tau,\Lambda) = I_{1z}^{+} + \frac{I_{2x}^{-} I_{1z}^{x} I_{1x}^{z}}{1 - I_{1x}^{-} I_{2x}^{-}}; \quad I_2^{+1z}(\tau,\Lambda) = \frac{I_{1z}^{x} I_{2z}^{z}}{1 - I_{1x}^{-} I_{2x}^{-}}.$$

Если граница свет/тень расположена параллельно оси x, то выход излучения $I_1^{+2z}(\tau,\Lambda)$ из освещенного слоя и $I_2^{+2z}(\tau,\Lambda)$ из неосвещенного слоя в направлении $+z$ равен

$$I_1^{+2z}(\tau,\Lambda) = I_{1z}^{+} + \frac{I_{2y}^{-} I_{1z}^{y} I_{1y}^{z}}{1 - I_{1y}^{-} I_{2y}^{-}}; \quad I_2^{+2z}(\tau,\Lambda) = \frac{I_{1z}^{y} I_{2y}^{z}}{1 - I_{1y}^{-} I_{2y}^{-}}.$$

При падении излучения по оси y выход $I_1^{+1y}(\tau,\Lambda)$ и $I_2^{+1y}(\tau,\Lambda)$ из освещенного слоя и $I_2^{+2y}(\tau,\Lambda)$ и $I_2^{+2y}(\tau,\Lambda)$ из неосвещенного слоя в направлении $+y$, равен

$$I_1^{+1y}(\tau,\Lambda) = I_{1y}^{+} + \frac{I_{2x}^{-} I_{1y}^{x} I_{1x}^{y}}{1 - I_{1x}^{-} I_{2x}^{-}}; \quad I_2^{+1y}(\tau,\Lambda) = \frac{I_{1y}^{x} I_{2x}^{y}}{1 - I_{1x}^{-} I_{2x}^{-}};$$

$$I_1^{+2y}(\tau,\Lambda) = I_{1y}^{+} + \frac{I_{2z}^{-} I_{1y}^{z} I_{1z}^{y}}{1 - I_{1z}^{-} I_{2z}^{-}}; \quad I_2^{+2y}(\tau,\Lambda) = \frac{I_{1y}^{z} I_{2z}^{y}}{1 - I_{1z}^{-} I_{2z}^{-}}.$$

Методика определения функции контрастности светлой полоски для пространственно ограниченной дисперсной среды заключается в следующем. Разделим объем в форме параллелепипеда на три части, среднюю из которых осветим нормально падающим параллельным потоком излучения. Обозначим выход в направлении падающего излучения из освещенной части $I_1^{1z}(\tau,\Lambda)$, из неосвещенных частей $I_2^{1z}(\tau,\Lambda)$ и $I_3^{1z}(\tau,\Lambda)$. Тогда

$$I_1^{1z}(\tau,\Lambda) = I_{1z}^{+} + I_{1z}^{x} I_{1x}^{z} \left[\frac{I_{2x}^{-}}{1 - I_{1x}^{-} I_{2x}^{-}} + \frac{I_{3x}^{-}}{1 - I_{1x}^{-} I_{3x}^{-}} + \right.$$

$$\left. + \frac{I_{2x}^{-} + 2 I_{1x}^{+} I_{2x}^{-} I_{3x}^{-} + I_{3x}^{-}}{1 - (I_{1x}^{+})^2 I_{2x}^{-} I_{3x}^{-}}\right];$$

$$I_2^{1z}(\tau,\Lambda) = I_{1z}^{x} I_{2x}^{z} \left[\frac{1}{1 - I_{1x}^{-} I_{2x}^{-}} + \frac{1 - I_{1x}^{+} I_{3x}^{-}}{1 - (I_{1x}^{+})^2 I_{2x}^{-} I_{3x}^{-}}\right];$$

$$I_3^{1z}(\tau,\Lambda) = I_{1z}^{x} I_{3x}^{z} \left[\frac{1}{1 - I_{1x}^{-} I_{3x}^{-}} + \frac{1 - I_{1x}^{+} I_{2x}^{-}}{1 - (I_{1x}^{+})^2 I_{2x}^{-} I_{3x}^{-}}\right].$$

Эти формулы получены при условии падения излучения на грань xy в направлении z. Такие же формулы (только с другими индексами) получаются при другом (перпендикулярном к предыдущему) расположении светлой полоски на грани объема с дисперсной средой в виде параллелепипеда. При освещении граней yz и xz получаются еще 4 варианта формул. Таким образом, при падении излучения на пространственно ограниченную дисперсную среду возможны шесть вариантов вида функции контрастности светлой полоски, и, следовательно, функции передачи модуляции.

При рассмотрении функции передачи модуляции глубина модуляции характеризует контраст изображения косинусоидальной миры [1]. Для произвольных объектов контраст всего изображения или отдельных его участков можно записать в виде

$$K(\tau,\Lambda) = \frac{I_1^{+}(\tau,\Lambda) - I_2^{+}(\tau,\Lambda)}{I_1^{+}(\tau,\Lambda) + I_2^{+}(\tau,\Lambda)}.$$

Минимальный или пороговый контраст определяется оптическими размерами дисперсной среды, индикатрисой рассеяния излучения и вероятностью выживания кванта. Результаты расчета величины контраста при различном расположении границы свет/тень на грани кубического объема с оптическими размерами 4×4×4 приведены в таблице. Из данных, приведенных в таблице, следует, что контраст границы свет/тень, наблюдаемый через дисперсную среду, в значительной мере зависит от соотношения освещенной и неосвещенной частей объема, причем эта зависимость проявляется сильнее при менее вытянутой индикатрисе рассеяния излучения. Увеличение поглощения в среде приводит к улучшению контраста при любой индикатрисе рассеяния и оптических размерах дисперсной среды.

Таблица. *Зависимость контраста от параметров среды и излучения*

Оптические размеры части объема дисперсной среды τ_x, τ_y, τ_z		Вероятность выживания кванта, Λ	Степень вытянутости индикатрисы рассеяния излучения	Контраст, K
Освещенной	Неосвещенной			
4×3×4	4×1×4	1,0	0	0,750
4×2×4	4×2×4	1,0	0	0,510
4×1×4	4×3×4	1,0	0	0,283
4×3×4	4×1×4	0,5	0	0,932
4×2×4	4×2×4	0,5	0	0,870
4×1×4	4×3×4	0,5	0	0,796
4×3×4	4×1×4	1,0	0,86	0,997
4×2×4	4×2×4	1,0	0,86	0,992
4×1×4	4×3×4	1,0	0,86	0,977

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. Учет пространственной ограниченности дисперсной среды необходим при расчете характеристик качества изображения, наблюдаемого через рассеивающую среду, причем определяющее влияние имеют условия освещения пространственно ограниченной дисперсной среды. Увеличение поглощения в среде улучшает качество изображения, к такому же результату приводит увеличение анизотропии индикатрисы рассеяния излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеге Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. – Минск: Наука и техника, 1985. – 328 с.
2. Иванов А.П., Лойко В.А. Оптика фотографического слоя. – Минск: Наука и техника, 1983. – 304 с.
3. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Некоторые особенности переноса излучения в пространственно ограниченных дисперсных средах // Известия Томского политехнического университета. – 2000. – Т. 303. – № 3. – С. 91–104.

УДК 553.411.071.242.4+550.4